

УДК 549.6.04

## КІНЕТИКА ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ЖОВЧНИХ КАМІНЦІВ ЗА УМОВ МЕХАНІЧНОГО СТИСНЕННЯ

У. Борняк, В. Дяків, О. Матковський

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
79005 м. Львів, вул. Грушевського, 4  
E-mail: dyakivw@yahoo.com*

На підставі експериментальних біомінералогічних досліджень описано найпоширеніші кінетичні закономірності зародження й розвитку тріщин у жовчних камінцях за умов механічного стиснення. Проаналізовано характер і поетапність зародження тріщин для різних морфоструктурних типів жовчних камінців. Виявлено залежності між руйнуванням ядра жовчних камінців та їхніх периферійних ділянок, між характером поверхні злому та закономірностями поширення тріщин.

*Ключові слова:* біомінералогія, жовчні камінці, механічне стиснення, кінетика тріщиноутворення, експериментальне дослідження *in vitro*.

Аналіз наукових публікацій та отримані результати біомінералогічних досліджень жовчних камінців (ЖК) свідчать, що одним із головних чинників формування морфології та утворення тріщин є механічне стиснення [2–5]. У жовчному міхурі причиною механічного стиснення є рефлекторне скорочення його м'язів, пов'язане з процесами жовчовиділення [12]. Коли ж у жовчному міхурі зароджуються конкременти, то сила механічного стиснення напряму передається на камінці й, відповідно, впливає на їхню морфологію [2, 16]. Механічне стиснення відбувається у періоди скорочення жовчного міхура і в цьому разі, крім самоорганізації морфології камінців, може активізувати процеси тріщиноутворення, деформацію структури й зародження тріщин, що веде до руйнування конкрементів, насамперед, їхніх приповерхневих шарів. З'ясування механізмів руйнування ЖК є актуальною проблемою в разі застосування методів літотрипсії під час лікування жовчнокам'яної хвороби.

Проте жодних даних про зв'язок між морфологією, структурою, речовинним складом ЖК і кінетикою утворення в них тріщин у медичній та мінералогічній літературі ми не виявили [1]. Переважна більшість ЖК має безліч неоднорідностей, починаючи від дефектів чи слабких місць у структурі кристалів і закінчуючи тріщинами й порожнинами різних розмірів, які зосереджені на контакті кристалів чи пронизують камінь. Вони також відрізняються за формою, розміром та орієнтацією зерен, що зумовлює особливості мікроструктури й різні морфоструктурні різновиди ЖК. Багатьма авторами з'ясовано, що речовинний склад впливає на пружні та пластичні властивості ЖК, оскільки наявність у камені холестерину з підвищеними пластичними властивостями поширює ці властивості на весь камінь, і, навпаки, наявність у речовинному складі білірубінату кальцію й карбонатів зумовлює наяв-

ність пружних властивостей [13]. Тому для дослідження ми попередньо готували вибірки ЖК різного речовинного складу, розміру та морфоструктури.

Зазначимо, що в жовчному міхурі жовчні камінці постійно перебувають у жовчі – водному середовищі з розчиненими органічними й мінеральними компонентами. Проте в разі прямого міжкамінцевого контакту в умовах *in vitro* наявність рідини (жовчі) мало впливає на зародження й поширення тріщин, адже найважливішим чинником зародження тріщин є механічне стиснення. Ось чому під час експериментів *in vitro* чинник перебування у водному середовищі ми не брали до уваги. Те ж саме стосується і деяких фізичних параметрів експерименту, зокрема температури. Температура жовчі та ЖК в умовах *in vivo* – печінки (яка є найгарячішим органом в організмі людини), жовчовивідних шляхів і жовчного міхура, майже на два десятки градусів відрізняється від експериментів *in vitro* в умовах кімнатної температури. Незважаючи на це, суттєвих змін біомінерального складу ЖК не зафіксовано. Відбувається лише процес їхньої дегідратації: зі зменшенням вмісту моногідрату холестерину зростає вміст ангідриду холестерину, а за фізичними властивостями (твердість, густина тощо) вони дуже схожі між собою, що підтверджено біомінералогічними та рентгенодифракційними дослідженнями.

Усі наведені вище факти є тими чинниками, за допомогою яких багато дослідників [8, 10–15] обґрунтовувало коректність проведення експериментів із ЖК в умовах *in vitro*. В літературі описано численні досліді *in vitro* з літотрипсійного руйнування ЖК [8, 9], їхнє фрагментування [13] і розчинення різними реагентами [10, 11, 14, 15]. Водночас у праці [9] зазначено, що результати експериментальних досліджень, отримані в умовах *in vitro*, треба обов'язково враховувати під час лікування жовчнокам'яної хвороби, однак не можна напряму застосовувати у клінічній практиці.

Досліджено 100 взірців ЖК з 68 асоціацій, представлених клінікою кафедри загальної та факультетської хірургії Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького.

Камінець підлягав механічному стисненню з двох боків протилежних сторін. Напряму стиснення вибирали так, щоб рівномірно розподілити зовнішній вплив на структуру камінця. Це давало змогу об'єктивно спостерігати кінетичні закономірності тріщиноутворення. Спостережувані експериментальні ефекти, що відбуваються в ЖК за умов *in vitro*, фіксували на відеозображенні та досліджували за алгоритмом, описаним у методиці досліджень.

Вивчали також взірці камінців з однопросторових асоціацій фасеткових ЖК із помітними та значними варіаціями мікроморфології поверхні: від дзеркально-гладкої до ступінчастої, окремі фасеткові ЖК з ознаками руйнування приповерхневих прошарків у положенні *in vivo*.

Для вивчення кінетики тріщиноутворення під час зовнішнього механічного стиснення ми виконали низку досліджень *in vitro*, метою яких було проаналізувати характер і поетапність зародження тріщин та особливостей руйнування.

Використовували установку (рис. 1), яка складалася з лабораторного штатива 1, до якого прикріплені лещата 2 і цифрова відеокамера 4, з'єднана з комп'ютером 5.

У лещатах шляхом механічного стиснення двома затискачами взірець 3 фіксували та руйнували.

Цифрова відеокамера дає змогу записувати у форматі \*.AVI всі етапи експерименту.

Штатив фіксував у нерухомому стані як відеокамеру, так і лещата (див. рис. 1).

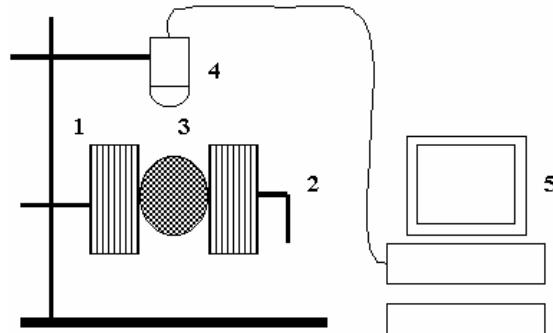


Рис. 1. Схема установки для вивчення кінетичних закономірностей руйнування жовчних камінців.

Отримані відеозображення процесів зародження тріщин, їхнього розростання та остаточного руйнування камінців опрацьовували за допомогою мультимедійних і графічних програм. Задокументоване відеозображення процесів тріщиноутворення фрагментували на окремі кадри (світлини), які відображали послідовні події руйнування камінців. Виявлені морфологічні особливості тріщин, швидкість їхнього поширення, характер руйнування окремих частин камінця чи його повної деструкції були підставою для визначення типу тріщини й передумов її появи в кожному окремому випадку. Морфологію отриманих фрагментів описували макро- та мікроскопічно.

На початкових етапах механічного стиснення ЖК зі сфероліт-дендритною мікроструктурою внаслідок зростання напруженості між кристалічними індивідами у приповерхневих ділянках з'являються **точкові дефекти** (рис. 2, а; 3, а). Макроскопічно вони не виявляються, однак чітко фіксовані під час мікроскопічного дослідження та за слабко помітною деформацією поверхні камінця (без порушення її суцільності). Значна кількість точкових дефектів призводить до появи певних видовжених напрямів їхнього поширення, які згодом трансформуються у **лінійні ультрамікротріщини** та **власне мікротріщини** (див. рис. 2, б; 3, б).

Коли напрями поширення мікротріщин унаслідок посилення механічного стиснення відрізняються від лінійного (тріщини перетинаються між собою, є дотичними одна до одної), то в камінці починає формуватись спочатку **перехресна**, а потім **дендритна тріщинна система** (див. рис. 2, в; 3, в). У цій системі дефекти швидко поширюються по місцях контактів дендритних агрегатів холестерину (див. рис. 2, г; 3, г). Про це свідчить сегментарність поширення тріщин: усі вони проходять крізь центр камінця, розділяючи його на окремі сектори (сегменти) (див. рис. 2, е; 3, д). Вершини сегментів, найближче розташовані до центра конкременту, часто затуплені.

Завершальним наслідком механічного стиснення камінців є поява **об'ємних тріщин** (див. рис. 2, ж-і; 3, е). Ці тріщини утворюються внаслідок дії одних сегментів камінця як важелів, а інших – як місць їхньої опори. У результаті цього фрагментовані сегменти розходяться в просторі.

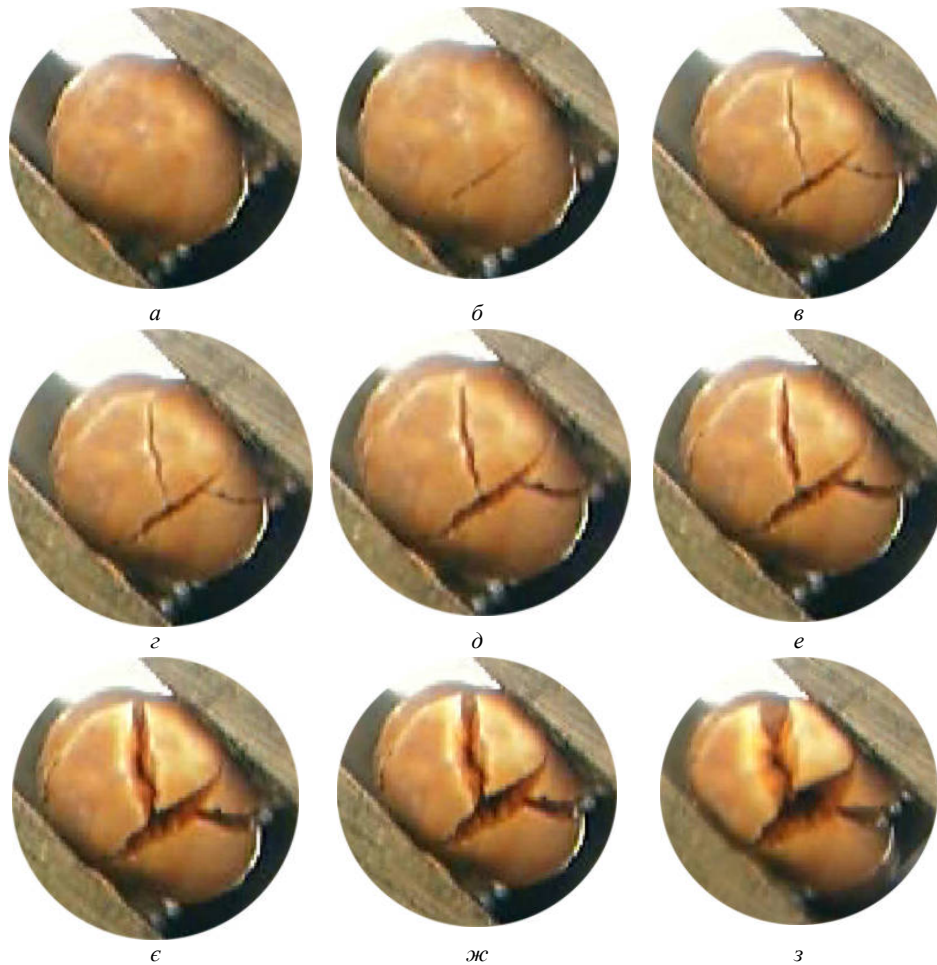


Рис. 2. Кінетика спонтанного формування перехресних тріщин у каменях типу “шовковиця”.

Отримана картина поширення об'ємної тріщини по всьому простору камінця дає змогу визначити різні етапи зростання лінійних розмірів тріщини та її просування. На уламках досліджуваного сфероліт-дендритного камінця виявлено кілька ділянок з різними типами поверхонь злому – дзеркальною, шорсткою, ступінчастою та скалковою. Передбачають, що за високої швидкості поширення тріщини ділянка, де відбувається її розгалуження, має дзеркальний рельєф поверхні злому, який переходить у ступінчастий. Різке сповільнення поширення головної тріщини призводить до появи розгалуження, за якого частина пружної енергії системи йде на формування зони попереднього руйнування і появи вторинної тріщини з характерною ступінчастою та скалковою поверхнею.

Зазначимо, що у сфероліт-дендритних камінцях далеко не завжди механічне стиснення призводить до появи перехресних, дендритних чи об'ємних тріщин. У

випадку формування **точкових дефектів** лише в одній площині камінець буде руйнувати **плоска наскрізна тріщина**, яка розділить його на дві однакові частини (рис. 4, *a–г*).

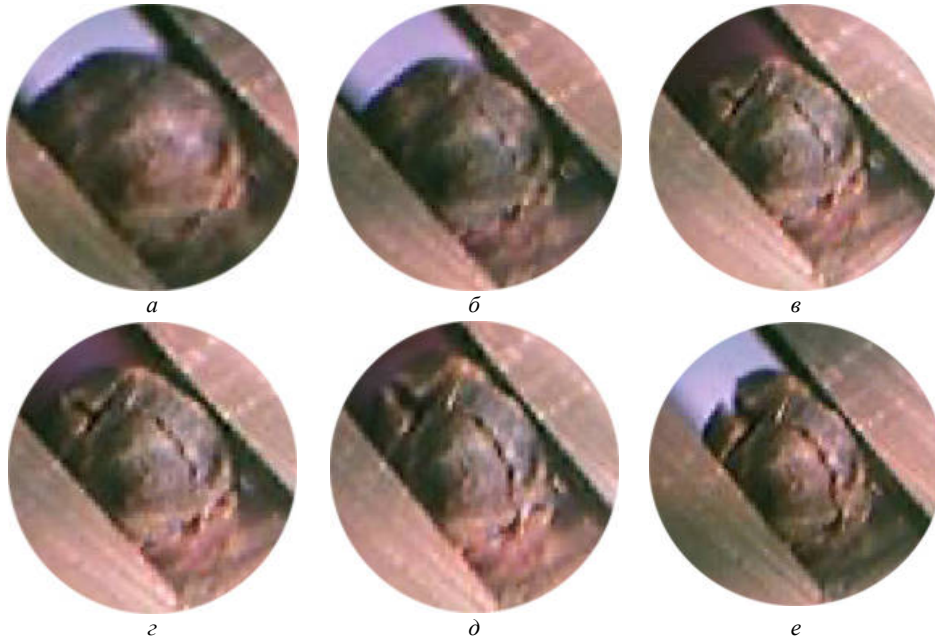


Рис. 3. Кінетика формування перехресних тріщин у дрібних каменях типу “шовковиця”.

Трансформація сфероліт-дендритного росту в пошарову седиментацію напряду впливає на стійкісні властивості каменів. Шарувата мікроструктура суттєво пом’якшує зародження тріщин, буферує механічне стиснення, блокує наскрізне й перехресне руйнування.

Тріщиноутворення супроводжується **лущенням** і **спорадичним відривом** (рис. 5). За незначної сили механічного стиснення такі камінці не зазнають помітних зовнішніх морфологічних змін, однак у приповерхневій частині локалізуються численні **точкові дефекти** (див. рис. 5, *a*).

Зі збільшенням внутрішніх напружень точкові дефекти відразу трансформуються у **відкриті тріщини відриву**, або, іншими словами, відбувається **лущення** та **відрив приповерхневих прошарків** (див. рис. 5, *б, в*) у такому порядку: з’являються точкові дефекти, які трансформуються у тріщини відриву із лушенням та відривом приповерхневих прошарків, що повторюється кілька разів (див. рис. 5, *г–е*). Це триває доти, доки у секторі камінця, в якому максимально виявляються процеси дезінтеграції, цілковито не зруйнується шарувата мікроструктура (див. рис. 5, *є*). Повна деструкція камінця пришвидшується наявними внутрішніми порожнинами й ослабленими ділянками у дефектному ядрі камінця (див. рис. 5, *ж, з*).

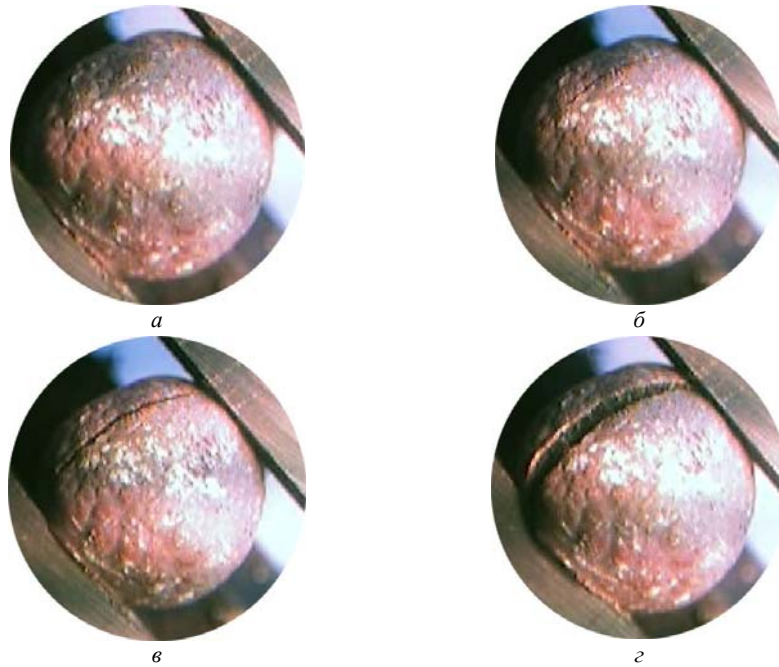


Рис. 4. Кінетика формування наскрізної тріщини у каменях типу “шовковиця”.

Найчіткіше **лущення** та **відрив лусок** виявляються у ритмічно-шаруватих камінцях зі стійким ядром (рис. 6). В умовах механічного стиснення такі камінці вже за найменших напружень помітно змінюють морфологічний обрис. На наш погляд, це зумовлено строкатим речовинним складом камінців: у них сусідні прошарки та ядро суттєво відрізняються за біомінеральним складом. Саме тоді виникають передумови для лушення.

На початкових етапах стиснення у приповерхневій частині так само виникають численні **точкові дефекти** (див. рис. 6, *a*). Зі збільшенням внутрішніх напружень точкові дефекти відразу переходять у **відкриті тріщини відриву** з формуванням **великих лусок** та **відірваних приповерхневих прошарків** (див. рис. 6, *б, в*). Велика луска у фасеткових камінцях дуже часто успадковує поверхню граней. Тобто найбільш ослабленими ділянками фасеткових камінців, де локалізуються точкові дефекти в разі механічного стиснення, є їхні ребра. Після повного відриву першої великої луски точкові дефекти з'являються на суміжних гранях фасеткового ЖК (див. рис. 6, *z–e*). Ці точкові дефекти трасують великі луски відриву на сусідніх гранях фасеткового камінця.

Внаслідок руйнування камінців утворюються різні за формою та скульптурованістю уламки ЖК (рис. 7).

Серед камінців типу “шовковиця” (див. рис. 7, *a, б*) домінують, головню, ізометричні, клиноподібні фрагменти, рідше видовжені форми, орієнтовані доцентрово. У приповерхневій частині вони кутасті зі скалковою поверхнею злому.



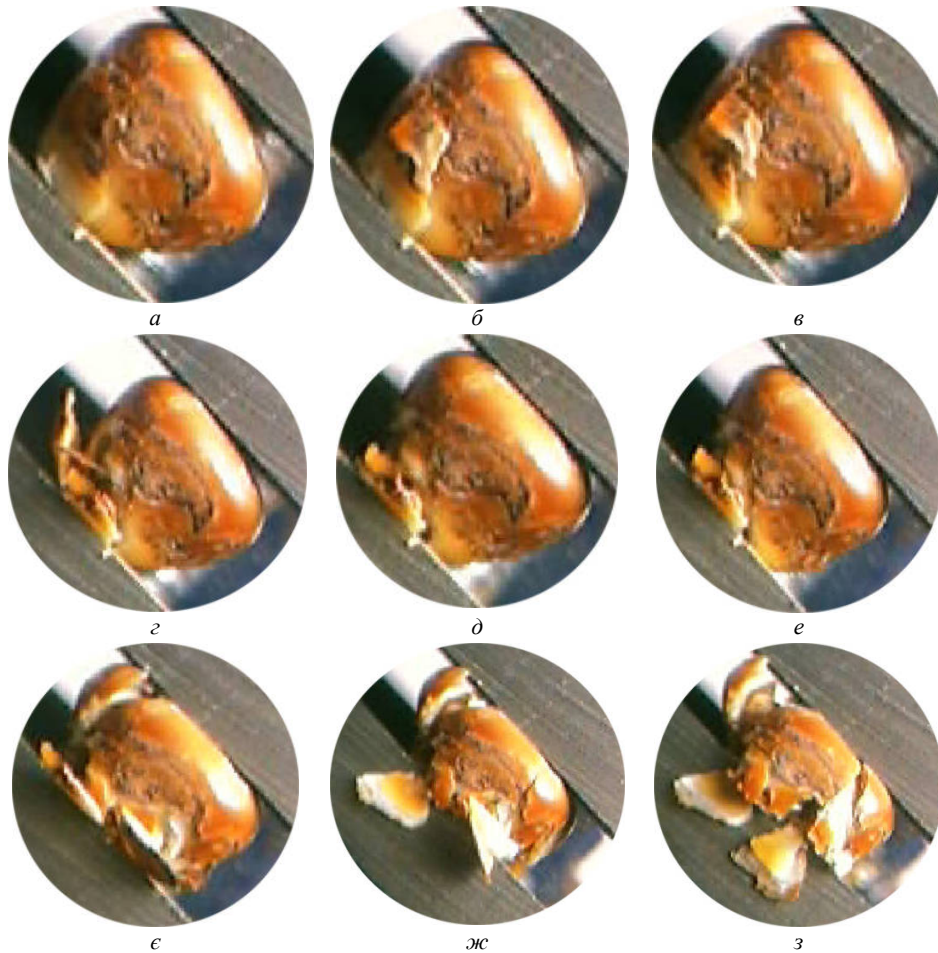


Рис. 5. Етапи лущення приповерхневого прошарку з пізнішим розколюванням та деструкцією ядра.

Мікроскульптуру поверхні злому уламків визначають сфероліт-дендритні агрегати холестерину. У цій мікроскульптурі наявні дрібні рельєфні гілочки первинних дендритів і перекристалізованих сферолітів у вигляді віялоподібних зростків мікрочастин холестерину.

Колір поверхонь злому має високий ступінь контрастності: у ядерній частині підвищується інтенсивність забарвлення завдяки червоно-коричневим аж до чорних тонам найпоширенішого пігменту ЖК – білірубінату кальцію. У приповерхневій частині знижуються відмінності в інтенсивності і тонах забарвлення (від темно-жовтого, оранжевого, бурого до жовтого й білого).

Розмір уламків становить 1/4 від розміру камінця: в середньому коливається від 3–4 до 7–8 мм у поперечнику. У цьому разі чітко простежується належність уламків

до однієї фракції за розміром (див. рис. 7 *а, б*). Уламків, які б суттєво відрізнялися від усередненого розміру, не виявлено.

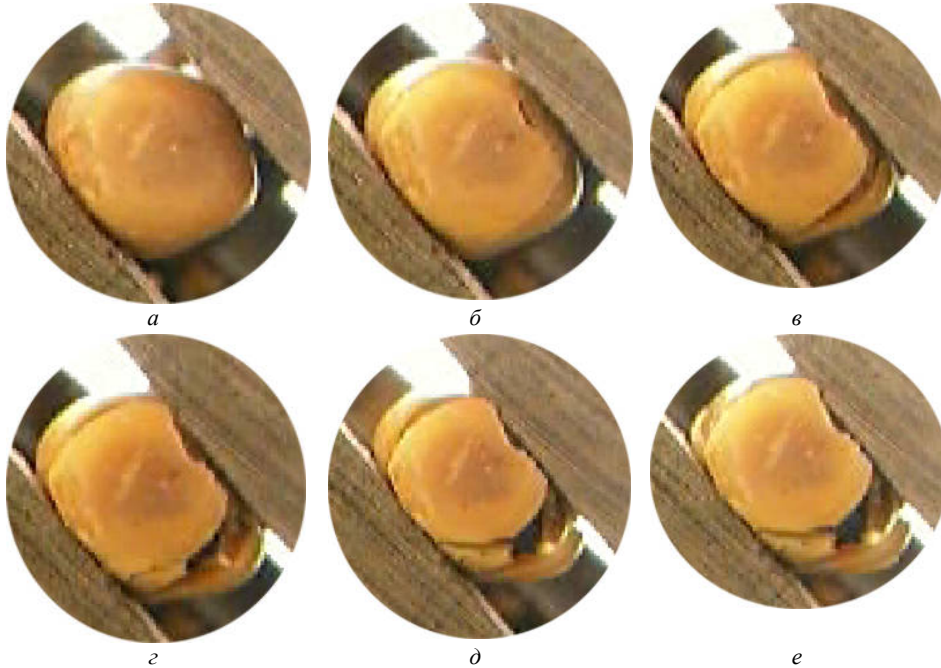


Рис. 6. Етапи лущення та сколювання приповерхневого прошарку в умовах стійкого ядра каменя.

Уламки фасеткових ЖК (див. рис. 7 *в, г*) мають форму тонких лускоподібних, субпаралельно-пластинчастих, зазвичай слабо видовжених, однак анізотропних фрагментів, різноорієнтованих як у напрямі до центра камінця (див. рис. 7, *в*), так і в одному з напрямів, де в камінці були ослаблені ділянки.

Уламки мають складну мікроскульптуру поверхонь злому: від дзеркально-гладкої до ступінчастої та скалкової. На тлі дрібних, головню, лускуватих уламків суттєво відрізняються великі сегменти камінців зі сфероліт-дендритною й шаруватою мікроструктурою. Дрібноуламкова фракція є розсіяною системою гострокутних (“іскристих”) лускоподібних уламків, які зберігають обриси первинної мікроструктури.

Певний вплив на властивості дрібноуламкових частинок має і мікрорельєф їхньої поверхні. Шорсткість поверхні зумовлює збільшення сумарної поверхні взаємодії частинок між собою і з зовнішнім середовищем. Чим дрібніші частинки, тим більша частка їхньої поверхні припадає на ребра, кути, сходинки тощо. Розвинута шорсткість є одним із чинників зростання енергетичної неоднорідності поверхні, оскільки атоми на кутах і ребрах мають ненасичені хімічні зв'язки і, отже, високу реакційну здатність.





Рис. 7. Уламки жовчних камінців різних морфологічних типів:  
*а, б* – типу “шовковиця”; *в, з* – фасеткових.

Будова приповерхневих ділянок фасеткових ЖК однорідна або зональна. Зональність зумовлена чергуванням тонких дрібнозернистих концентрично розташованих прошарків, відмінних за речовинним складом, насамперед, за вмістом білірубінату кальцію та карбонатного матеріалу. Центральна частина камінців іноді містить об'ємні зіркоподібні порожнини. По променях цих зірок, зазвичай, поширюються тріщини.

За розміром уламки фасеткових ЖК різноманітні: від грубих уламків до дрібних лусочок – від 10–20 до менше 1 мм у поперечнику. Кількісно домінують дрібноуламкові фракції (див. рис. 7, *в, з*), хоча за сумарним об'ємом понад 50 % камінця становлять грубі уламки.

На підставі дослідження можна виділити такі головні типи руйнування фасеткових ЖК різного речовинного складу та мікроструктури:

1) лушення приповерхневого прошарку з пізнішим розколюванням і деструкцією ядра;

2) лущення та сколювання приповерхневого прошарку в умовах стійкого ядра каменя;

3) наскрізне розтріскування ритмічно-шаруватої оболонки з вивільненням ядерної частини;

4) реактивне руйнування ЖК зі стійким до механічного впливу приповерхневим прошарком.

Отже, для дрібнозернистої тонкошаруватої мікроструктури, яка щільно контактує зі сфероліт-дендритною, на початковій стадії механічного стиснення характерне поетапне відшарування (лущення) уламків ЖК. Такі уламки мають форму тонких лускоподібних, субпаралельно-пластинчастих, клиноподібних фрагментів.

Дослідження каменів типу “шовковиця” свідчать про те, що дендритоподібна радіально-промениста структура та горохоподібна поверхня, що сформувались за фрактальним механізмом, є своєрідним детонатором наскрізного чи перехресного тріщиноутворення й руйнування каменя будь-якого типу. Приповерхневі прошарки у “шовковиць” практично не руйнуються. Передумовою формування різних типів тріщин у разі механічного стиснення є неоднорідність морфоструктури ЖК: за наявності ослабленої ділянки, що трасується більш-менш прямою лінією зрощення мікросферолітів, генерується наскрізна тріщина, а за інших умов – перехресні тріщини.

У випадку наскрізного розтріскування ритмічно-шаруватої оболонки з вивільненням ядерної частини простежується роз'єднаність шаруватої оболонки та сфероліт-дендритного ядра внаслідок його перекристалізації (пігментування). У разі механічного впливу на такі камені виникає ефект, що простежується під час розлущення сухого лісового горіха (“ефект горіха”): дезінтегрується міцна оболонка й вивільнюється ядерна частина. У таких каменях стійкість визначена мінеральним складом оболонки: за наявності карбонатів кальцію стійкість зростає, кількість білірубінату кальцію зменшується, холестерину – суттєво не змінюється.

Реактивне руйнування ЖК відбувається в умовах еластичних і пружних властивостей шаруватої оболонки ЖК та енергетично напруженого стану сфероліт-дендритного ядра. Стійкі до механічного впливу еластичні та пружні приповерхневі прошарки за умов сильного механічного стиснення до певного часу блокують руйнування ЖК. Енергія механічного стиснення передається у сфероліт-дендритну структуру, що призводить до зростання її напруженості. Однак коли сила механічного впливу чи енергетична напруженість сфероліт-дендритних агрегатів перевищать стійкість приповерхневого прошарку, то ЖК буде притаманне реактивне руйнування, що відбувається внаслідок вивільнення енергії накопичених внутрішніх напружень і супроводжується швидким роз'єднанням первинно цілісного камінця.

Як бачимо, є всі підстави стверджувати, що кінетика тріщиноутворення, напрям і характер руйнування та форма фрагмента в разі зовнішнього механічного стиснення ЖК різних морфоструктурних типів залежать від структури каменя, розміру зерен, напряму порожнин і потужності шарів, морфології, мікроморфології поверхні, мінерального складу ЖК та напряму зовнішнього впливу.

Візуальний аналіз продуктів руйнування засвідчив, що напрям руйнування та форма фрагмента залежать від структури каменя, розміру зерен, напряму порожнин і потужності шарів.

1. *Ганіткевич Я.В.* Типи жовчних холестеринових конкрементів та деякі закономірності їх формування // Лікар. зб. 1996. Т. 3. С. 32–38.
2. *Ганіткевич Я.В., Дяків В.О., Матковський О.І.* Біомінералогічна модель міжкамінцевих (міжфрактальних) взаємодій у багаточисельних асоціаціях жовчевих камінців // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. 1999. Вип. 13. С. 106–115.
3. *Зузук Ф.В., Мелешко Т.В., Мамчур Ф.И.* О внутренних полостях и трещинах желчных камней // Минерал. сб. 1988. Т. 42. Вып. 1. С. 61–65.
4. *Кнубовец С.Я., Казаченко Э.Г., Мироненко Г.А.* Структура и состав желчных камней по данным микроскопии и рентгеноструктурного метода исследования // Лаб. дело. 1981. № 12. С. 731–733.
5. *Лузгин Б.И., Комлева И.В.* Эволюция желчных камней // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1987. № 4. С. 12–24.
6. *Мелешко Т.В., Зузук Ф.В.* Сферолито-дендритные структуры желчных камней // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. 1989. № 2. С. 63–68.
7. *Павловський М.П., Василечко Л.О., Ганіткевич Я.В., Кузьмик А.Г.* Рентгенографічні дослідження жовчних конкрементів // Доп. АН України. 1994. № 9. С. 154–158.
8. *Barkun A.N., Valette P.J., Montet J.C. et al.* Physicochemical determinants of in vitro shock-wave biliary lithotripsy // Gastroenterology. 1991. Vol. 100. N 1. P. 222–227.
9. *Bird N.C., Frost E.A., Kanaris-Sotiriou R., Johnson A.G.* The lessons from in vitro lithotripsy for the clinical treatment of gallstones // J. Hepatol. 1989. Vol. 9. N 1. P. 99–104.
10. *Farrell K.E., Smith D.C., Mackay C.* Gallstone dissolution in vitro // Brit. J. Surg. 1973. Vol. 60. P. 900.
11. *Funatsu K., Phillips M.J.* Dissolution of human cholesterol gallstones in vitro with bile salts. A scanning and stereoscanning electron microscopic study // Lab. Invest. 1979. Vol. 40. P. 166–171.
12. *LaMorte W.W., Schoetz D.J. Jr., Birkett D.H., Williams L.F. Jr.* The role of the gallbladder in the pathogenesis of cholesterol gallstones // Gastroenterology. 1979. Vol. 77. N 3. P. 580–592.
13. *Lobentanzer H., Neubrand M., Hermeking H., Sauerbruch T.* In vitro study to elucidate the physical laws concerning the fragmentation of both solitary and multiple artificial stones // Clin. Invest. 1993. Vol. 71. N 11. P. 882–887.
14. *Phillips M.J., Funatsu K., Oda M. et al.* Dissolution of human cholesterol gallstones in vitro with ethanol and ether // Lab. Invest. 1978. Vol. 39. P. 488–504.
15. *Way L.W.* In vitro dissolution of cholesterol gallstones // Surg. Forum. 1973. Vol. 24. P. 412–414.
16. *Wolpers C., Hofmann A.F.* Solitary versus multiple cholesterol gallbladder stones. Mechanisms of formation and growth // Clin. Invest. 1993. Vol. 71. N 6. P. 423–434.

**KINETICS OF THE CRACK-FORMATION IN GALLSTONES  
BY MECHANICAL COMPRESSION****U. Bornyak, V. Dyakiv, O. Matkovs'kyi**

*Ivan Franko National University of Lviv  
Hrushevskogo St. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine  
E-mail: dyakivw@yahoo.com*

The most widespread kinetic conformities of origin and development of cracks in the gallstones by mechanical compression are described on the basis of experimental biomineralogical researches. Analysis of the character and consecutive of origin of the cracks in gallstones of the different morphostructure types is carried out. The interdependence between destruction of gallstone kernel and their peripheral areas, between the fracture surface character and conformities of crack distribution is described.

*Key words:* biomineralogy, gallstones, mechanical compression, kinetics of crack-formation, experimental research *in vitro*.

Стаття надійшла до редколегії 28.04.2005

Прийнята до друку 06.09.2005